

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы |
|---|
| Опτικο-люминесцентные свойства алюмооборотной стеклокерамики, активированной ионами хрома |

УДК 666.266.6:535.37

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4В61 | Осипова Анастасия Юрьевна | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Валиев Д.Т. | к.ф.-м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Кащук И. В. | к.т.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|-------------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент ООД ШБИП | Черемискина М. С. | | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Степанов С.А. | к.ф.-м.н | | |

Томск – 2020 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) |
|-------------------------------------|--|
| Профессиональные компетенции | |
| P1 | <i>Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники</i> |
| P2 | <i>Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий</i> |
| P3 | <i>Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники</i> |
| P4 | <i>Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий</i> |
| P5 | <i>Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов</i> |
| P6 | <i>Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач</i> |
| Универсальные компетенции | |
| P7 | <i>Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники</i> |
| P8 | <i>Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности</i> |
| P9 | <i>Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации</i> |
| P10 | <i>Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности</i> |
| P11 | <i>Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности</i> |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
Отделение школы (НОЦ) Отделение
материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
С.А. Степанов
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

| |
|--|
| Бакалаврской работы |
| (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации) |

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------|
| 4В61 | Осипова Анастасия Юрьевна |

Тема работы:

| | |
|---|--|
| Оптико-люминесцентные свойства алюмооборотной стеклокерамики, активированной ионами хрома | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | |

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|---|
| <p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Статьи и материалы по теме ВКР. 2. Объект исследования – алюмооборотная стеклокерамика, активированная ионами хрома переменного состава. 3. Импульсный оптический спектрометр на базе сильноточного ускорителя электронов; 4. Оптоволоконный спектрометр Avantes 2048; 5. Цифровой осциллограф LeCroy-WR 6030A; 6. Оптическое оборудование (линзы, световоды и т.п.). |
| <p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы: Функциональные свойства оксидных стеклокерамик; Физико-химические свойства стеклокерамик, допированных ионами переходных металлов; Люминесцентные свойства стеклокерамики; 2. Оптические свойства и спектрально-кинетические характеристики алюмооборотной |

| | |
|---|--|
| | стеклокерамики, переменного состава при импульсном фото- и катодо- возбуждении; 3. Анализ полученных результатов |
| Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) | 1. Оптические спектры пропускания, спектры импульсной фото- и катодолюминесценции алюмообратной стеклокерамики переменного состава; 2. Спектрально-кинетические характеристики исследуемых образцов стеклокерамики. |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов) | |
| Раздел | Консультант |
| Финансовый менеджмент | Доцент ОСГН ШБИП Кащук Ирина Вадимовна |
| Социальная ответственность | Ассистент ООД ШБИП Черемискина Мария Сергеевна |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| <i>Перевод осуществляться не будет</i> | |
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | |

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Валиев Дамир Талгатович | к.ф.-м.н. | | 29.09.2019 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------------|
| 4B61 | Осипова Анастасия Юрьевна | | 29.09.2019 |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------|
| 4B61 | Осипова Анастасия Юрьевна |

| Школа | ИШНПТ | Отделение школы | Материаловедение |
|---------------------|----------|---------------------------|----------------------|
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | 12.03.02 Оптотехника |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|---|---|
| 1. Стоимость ресурсов научно-исследовательского проекта (НИП): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ. |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | Отчисления во внебюджетные фонды 30 % |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| 1. Анализ конкурентных технических решений (НИП) | Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ |
| 2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИП) | Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования. |
| 3. Составление бюджета научно-исследовательского проекта (НИП) | Расчет бюджетной стоимости НИП по разработке программного обеспечения |
| 4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИП) | Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности. |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИП
5. Основные показатели эффективности НИП

| | |
|--|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|--|--|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Кашук Ирина Вадимовна | к.т.н, доцент | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4B61 | Осипова Анастасия Юрьевна | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------|
| 4B61 | Осипова Анастасия Юрьевна |

| Школа | ИШНПТ | Отделение (НОЦ) | Материаловедения |
|---------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| Уровень образования | Бакалавриат | Направление/специальность | 12.03.02 «Оптотехника» |

Тема ВКР:

| | |
|--|---|
| Оптико-люминесцентные свойства алюмооборотной стеклокерамики, активированной ионами хрома | |
| Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: | |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | Характеристика работы: компьютерный анализ данных. Объект исследования: образцы алюмооборотной стеклокерамики, активированной ионами хрома; область применения: персональная дозиметрия, лазерные среды, излучатель красного света. |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| 1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. | - ЕК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От 01.04.2019) - ГОСТ 12.2.032-78 - ФЗ № 426 «Об специальной оценке условий труда» - СанПиН 2.2.2./2.4 - Трудовой Кодекс РФ - Приказ Министерства Здравоохранения РФ №302н - СП 52. 13330.2011 - ГОСТ 12.1.038-82 |
| 2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия | - Отклонение показателей микроклимата; - Превышение уровня шума; - Уровень освещенности на рабочей поверхности; - Повышенное значение напряжения в электрической цепи. |
| 3. Экологическая безопасность: | - Синтез объекта исследования не влияет на окружающую среду; - Утилизация объектов без вреда для окружающей среды |
| 4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: | - возможные ЧС: аварии на коммунально-энергетических сетях внезапное обрушение зданий, диверсия, сильные морозы и др.; – типичная ЧС: пожар. |

| | |
|--|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|--|--|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент | Черемискина Мария Сергеевна | - | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4B61 | Осипова Анастасия Юрьевна | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 109 страниц, 28 рисунков, 19 таблиц, 61 источник.

Ключевые слова: стеклокерамика, ионы переходных металлов, люминесценция, спектрально-кинетические характеристики, спектр оптического поглощения, спектр фотолюминесценции, катодолюминесценция, кинетика затухания люминесценции.

Объектом исследования являются две серии образцов алюмооборотной стеклокерамики, активированной ионами хрома: образцы с переменной концентрацией хрома; образцы с переменной длительностью отжига.

Цель работы – провести комплексные спектроскопические исследования алюмооборотных стеклокерамик, легированных ионами хрома, изучить влияния концентрации примесных центров свечения и технологических режимов на оптические и люминесцентные свойства.

В процессе исследования проведен анализ, обработка и систематизация литературных данных оптических и люминесцентных характеристик исследуемых образцов алюмооборотной стеклокерамики, также проведен анализ исследования с позиции экономики и определены требования по технике безопасности и эксплуатации оборудования в процессе проведения исследований.

Область применения: персональная дозиметрия, лазерные среды, излучатель красного света.

Экономическая значимость работы заключается в создании новых функциональных материалов в сфере оптического материаловедения.

В будущем планируется дальнейшее изучение оптико-люминесцентных свойств стеклокерамики, активированной ионами переходных металлов.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

СК – стеклокерамический

ПМ – переходные металлы

ИКЛ – импульсная катодOLUMИнесценция

ФЛ – фотOLUMИнесценция

КЛ – катодOLUMИнесценция

JCPDS (the Joint Committee on Powder Diffraction Standards) - Объединенный комитет по стандартам порошковой дифракции

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 12 |
| Глава 1. Обзор литературы | 14 |
| 1.1 Оксидные стеклокерамические материалы | 14 |
| 1.2 Физико-химические свойства оксидных стеклокерамик | 22 |
| 1.3 Ионы переходных металлов | 24 |
| 1.4. Оптические и люминесцентные свойства стеклокерамик, активированных ионами хрома | 30 |
| Глава 2. Объекты и методы исследования | 38 |
| 2.1 Исследуемые образцы алюмообратной стеклокерамики, активированной ионами хрома..... | 38 |
| 2.1.1 Серия образцов с переменной концентрацией хрома | 38 |
| 2.1.2 Серия образцов с переменной длительностью отжига | 39 |
| 2.2 Методы исследования | 41 |
| 2.2.1 Структурный анализ при использовании рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu) | 41 |
| 2.2.2 Регистрация спектров ИКЛ на базе оптоволоконного спектрометра AvaSpec..... | 43 |
| 2.2.3 Методика импульсной катодолюминесцентной спектрометрии наносекундным временным разрешением..... | 45 |
| Глава 3. Результаты исследования | 49 |
| 3.1 Серия образцов с алюмообратной стеклокерамики с переменной концентрацией хрома..... | 49 |
| 3.1.1 Рентгенофазовый анализ | 49 |
| 3.1.2 Спектры оптического поглощения | 50 |
| 3.1.3 Спектры фотолюминесценции | 51 |

| | |
|---|----|
| 3.2 Серия образцов алюмооборатной стеклокерамики с переменной длительностью отжига | 54 |
| 3.2.1 Спектры оптического поглощения | 54 |
| 3.2.2 Спектры импульсной катодолюминесценции | 56 |
| 3.2.3 Исследования кинетики затухания при возбуждении электронным пучком | 58 |
| Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 62 |
| 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..... | 63 |
| 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений..... | 63 |
| 4.1.2 SWOT-анализ..... | 65 |
| 4.2 Планирование научно-исследовательских работ | 66 |
| 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования | 66 |
| 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения..... | 68 |
| 4.3 Бюджет научно-исследовательского проекта | 73 |
| 4.3.1 Расчет материальных затрат научно-исследовательского проекта .. | 73 |
| 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования | 74 |
| 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей НИП | 76 |
| 4.3.4 Дополнительная заработная плата | 77 |
| 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)..... | 78 |
| 4.3.6 Накладные расходы..... | 78 |
| 4.3.7 Бюджетная стоимость | 78 |
| 4.4 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования | 79 |

| | |
|--|----|
| Глава 5. Социальная ответственность | 83 |
| 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 84 |
| 5.2 Производственная безопасность | 86 |
| 5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов | 87 |
| 5.3.1 Отклонение показателей микроклимата | 87 |
| 5.3.2 Превышение уровня шума | 89 |
| 5.3.3 Отсутствие или недостаток естественного света | 89 |
| 5.3.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкания которой может произойти через тело человека | 90 |
| 5.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего) | 92 |
| 5.5 Экологическая безопасность | 92 |
| 5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях | 93 |
| Заключение | 95 |
| Список публикаций студента | 97 |
| Список используемых источников | 99 |

Введение

В настоящее время люминесцентные стеклокерамические (СК) материалы интенсивно исследуются различными мировыми научными группами на основе многообразных твердых растворов, порошков [1-3]. Связано это с лучшими технологическими возможностями прозрачных СК по сравнению с монокристаллами или прозрачными стеклами: более широкие возможные диапазоны рабочих температур, концентраций допантов и возможность совместного применения различных ионов переходных металлов (ПМ); гибкость варьирования технологических режимов; лучшие упруго-пластические свойства и экономичность технологии. В структуре СК с определенным фазовым составом обеспечивается более высокая однородность распределения активатора, достигаются лучшие характеристики преобразования УФ-излучения в видимое и ИК-излучение. Состав и тип оптических центров, динамика их формирования, положение, ширина и интенсивность линий поглощения и люминесценции могут существенно изменяться при достаточно малых вариациях параметров матрицы, которые можно плавно менять в случае различных твердых растворов.

Ионы переходных металлов (ПМ) (такие как Cr^{3+} , $\text{Mn}^{2+/3+}$, Ti^{3+}) применяются в качестве допантов к стеклокерамической матрице с целью направленного «дизайна» спектральных характеристик, и являются активаторами, формирующими центры свечения. Для достижения высокой эффективности люминесценции ионы-активаторы должны иметь отличающиеся от матрицы размеры ионов, зарядовые состояния, а также со-активаторы для компенсации разницы зарядов ионов матрицы и активатора, возникающих упругих локальных напряжений. ПМ обладают достаточно широкими излучательными характеристиками: широкие полосы за счет излучательных $3d$ переходов с характеристическим временем затухания люминесценции от микросекунд до миллисекунд [4-7].

Научная проблема, состоит в разработке новых люминесцентных оптических стеклокерамик на основе аморфных оксидных матриц, допированных ионами ПМ (хрома), которые необходимы для развития элементной базы оптико-электронных систем.

Целью выпускной квалификационной работы являются комплексные спектроскопические исследования алюмообратных стеклокерамик, легированных ионами хрома, изучение влияния концентрации примесных центров свечения и технологических режимов на оптические и люминесцентные свойства.

Для выполнения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Исследование физико-химических свойств, синтезированных исходных образцов стекол и стеклокерамики
2. Исследование спектрально-люминесцентных свойств, синтезированных СК с разной концентрацией хрома после проведения термообработок;
3. Исследование спектрально-кинетических свойств образцов стеклокерамик, обладающих оптимальными люминесцентными свойствами, при варьировании длительности отжига.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Оксидные стеклокерамические материалы

Стеклокристаллические материалы представляют собой новые неорганические материалы широкого технического назначения. Их получают путем тонкой кристаллизации стекол или расплавов различных составов, протекающей во всем объеме заранее отформованного изделия. Кристаллизация приводит к получению мелкозернистой и равномерной структуры, обеспечивающей высокие механические и термомеханические свойства изделия.

Стеклокерамика – это многофазная твердая система, содержащая аморфную фазу, в которой равномерно диспергирована кристаллическая фаза. Характерной особенностью кристаллохимии сложных оксидов является разнообразие возможных валентных состояний и структурных положений ионов-активаторов. Такое структурное расположение получается при специальном растяжении стекла, которое получают путем плавления и последующего отжига.

Существует два основных способа образования кристаллов (рисунок 1.1): объемная кристаллизация из объемного стекла и кристаллизация из аморфного порошка [8].

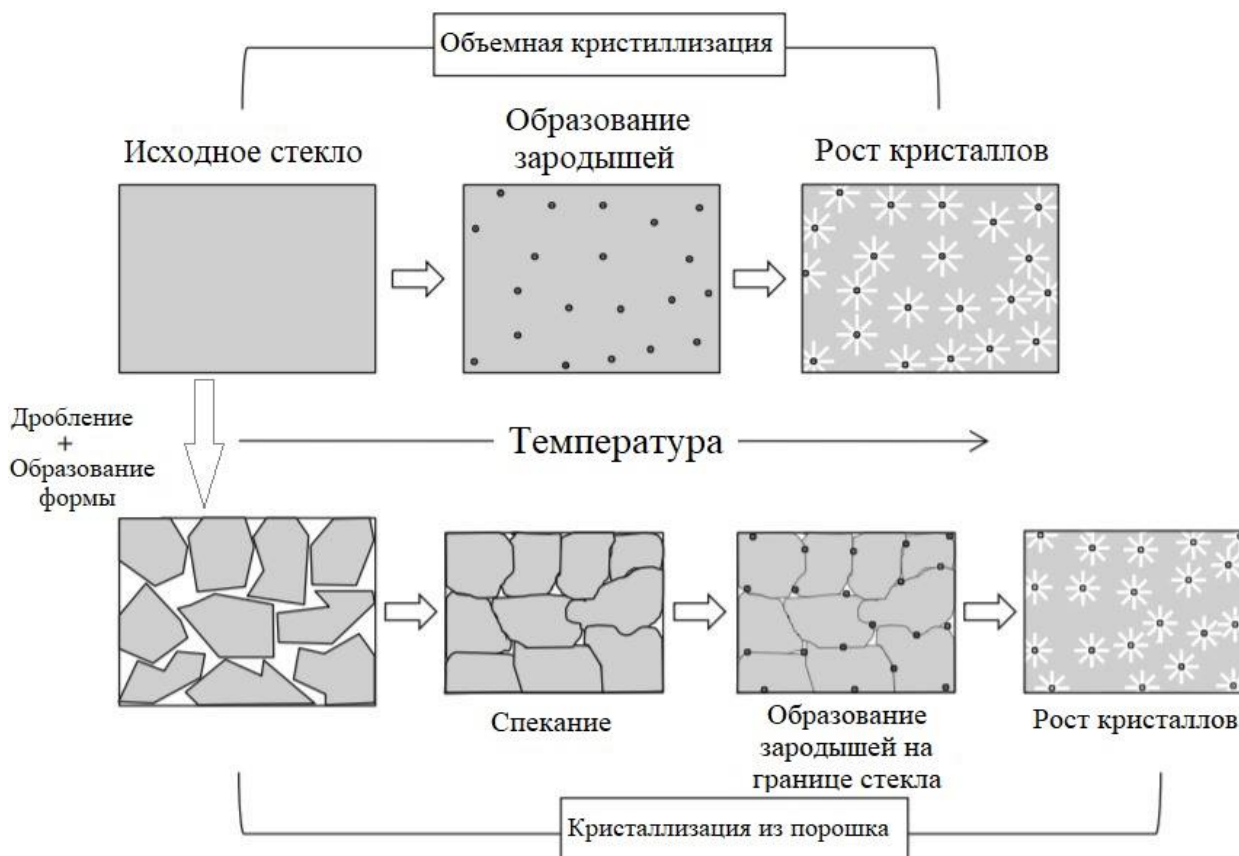


Рисунок 1.1 – Эволюция микроструктуры от стекла к стеклокерамике путем объемной кристаллизации из объемного стекла или спекания из порошка стекла [8]

При объемной кристаллизации, ядра, образовавшиеся на стадии создания зародышей, равномерно и случайным образом распределены по всему объему стекла. Таким образом, стадия роста кристаллов приводит к образованию тесно взаимосвязанной микроструктуры со средним размером кристаллов в области 1 мкм или меньше (50–100 нм). Для успешного получения стеклокерамики из объемного стекла необходимы контролируемые условия кристаллизации для получения однородного материала без дефектов, таких как трещины, отверстия или шероховатость поверхности. Обычно химический состав стекол, составленных для образования стеклокерамики путем объемной кристаллизации, включает зародышеобразователи, которые вызывают разрывы в стеклянной матрице, когда они вводятся в расплаве в небольших процентах. Типичными зародышеобразователями являются

оксиды и металлические коллоиды. Оксиды действуют либо по механизму изменения валентности (например, оксиды металлов, такие как TiO_2 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , MnO_2 , MoO_3 , WO_3 или V_2O_5), либо по механизму заряда с дисбалансом (например, неметаллические оксиды, такие как P_2O_5). Металлические коллоиды могут быть введены в состав стекла в виде оксидов или хлоридов и могут осаждать частицы металла посредством окислительно-восстановительных или фоточувствительных реакций (например, Cu, Ag, Au, Ru, Rh, Pb, Os, Ir и Pt). Другим распространенным зародышеобразователем в стеклокерамическом производстве является F-ион с ионным радиусом, подобным ионному радиусу, который может быть введен в стеклянную матрицу и привести к разделению кристаллов CaF_2 , которые действуют как центры зародышеобразования. Объемная кристаллизация также может быть произведена без влияния внешних веществ. В этом случае вторая жидкая фаза выделяется в стеклянной матрице, и несмешиваемость жидкость-жидкость ответственна за гомогенное зародышеобразование.

Большинство стеклокерамики изготавливаются путем контролируемого зародышеобразования в объеме исходного стекла, но существуют также стекла, в которых эта процедура неэффективна; зародышеобразование в объеме не может быть инициировано, а контролируемая кристаллизация может быть достигнута только путем поверхностного зародышеобразования. В этом случае наиболее эффективный способ изготовления стеклокерамики предполагает спекание и кристаллизацию порошкообразного стекла [9-10]. В этом процессе стеклянные частицы (3–15 мкм) должны быть сначала спрессованы с помощью традиционных технологий формования, таких как прессование или литье под давлением. Последующая термическая обработка для получения плотного стеклокерамического материала включает спекание до полной плотности перед завершением процесса кристаллизации.

Химический состав стекла должен быть подобран таким образом, чтобы во время термической обработки образовывалось и увеличивалось большое количество равномерно распределенных кристаллических ядер.

Стеклокерамика, полученная таким образом, может иметь необычные свойства, такие как очень низкое тепловое расширение, возникающее в результате этого высокого сопротивления тепловому удару.

В ряде стеклокерамик средние размеры кристаллов настолько малы, и совпадение показателя преломления кристаллов и остаточного стекла настолько близко, что эти стеклокерамики являются прозрачными. Это предполагает использование стеклокерамики в качестве люминесцентных материалов для лазеров, солнечных коллекторов или люминофоров, поскольку они должны обеспечивать материалы с высокой квантовой эффективностью, из которых могут быть изготовлены стержни и пластины.

Оксидная стеклокерамика состоит из сложных оксидов и обладает широким диапазоном прозрачности в диапазоне длин волн 0,2–4,5 мкм электромагнитного спектра. Эта прозрачность в значительной степени определяется двумя факторами, а именно химическим составом и примесями. Химический состав в основном контролирует края ультрафиолетового и инфракрасного поглощения в диапазонах длин волн 0,2–0,4 и 3,0–4,5 мкм соответственно.

При отсутствии каких-либо примесей в стеклокерамике полоса поглощения в диапазоне 0,3–3,0 мкм отсутствует. Обычные примеси, которые имеют полосы поглощения между этими диапазонами, представляют собой гидроксильную группу (группу OH), ионы 3d-переходного металла, ионы 4f-редкоземельного металла и т.д. Следовательно, эти примеси должны отсутствовать в стеклокерамике, когда нужна бесцветная прозрачная стеклокерамика. Тем не менее, эта бесцветная прозрачная стеклокерамика может быть функционализирована для определенных целей путем легирования (т.е. добавления в небольшом количестве) ионов 3d-переходного металла (скандия в медь, например) в форме оксида и использования их специфических или комбинации полос поглощения в диапазон длин волн 0,3–3,0 мкм.

Даи и соавторы в [11] описали широкополосную люминесценцию

легированной стеклокерамики $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с образованием кристаллов β -эвкриптита ($\beta\text{-LiAlSiO}_4$) в составе стекла (мол. %) $59\text{SiO}_2-19\text{Al}_2\text{O}_3-6\text{MgO}-6\text{Li}_2\text{O}-10\text{TiO}_2 + 0.5\text{Bi}_2\text{O}_3$. Механизм разделения фаз и миграции ионов, вызванный термообработкой, изображен на рисунке 1.2. При разделении фаз ион Al^{3+} замещает ион Si^{4+} в тетраэдрических точках кварца стеклянной матрицы, а баланс заряда сохраняется за счет иона Li^+ . Поскольку почти все ионы Li^+ и частичные ионы Al^{3+} входят в кристаллическую фазу и замещают почти половину ионов Si^{4+} ; следовательно, очень мало ионов Li^+ и остаточных ионов Al^{3+} все еще находятся в стеклообразной фазе.

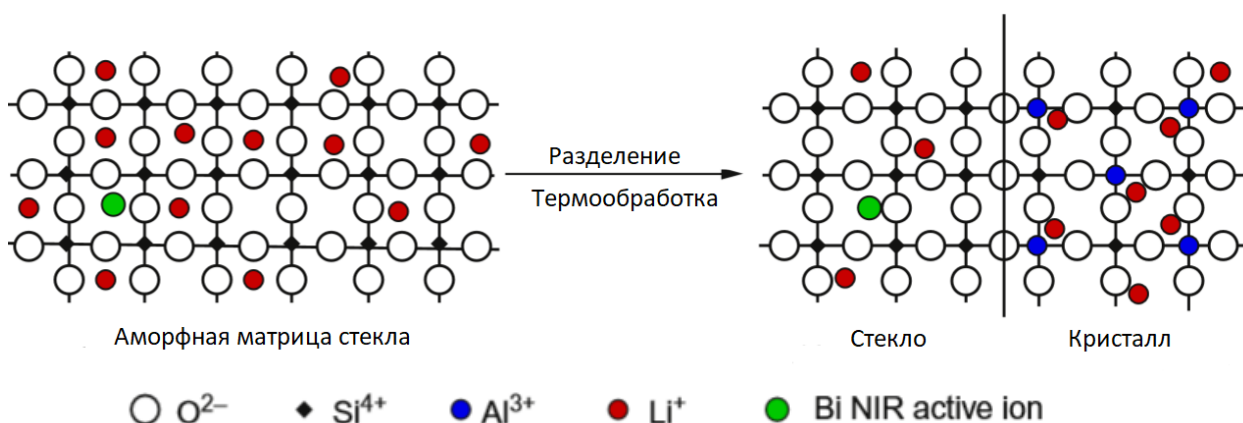


Рисунок 1.2 – Механизмы разделения фаз и миграции ионов, вызванные термообработкой, в Bi-легированном стекле состава $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (LAS) и стеклокерамики, термообработанных при различных температурах в течение 3 ч. [11]

В [12] сформулированы некоторые дополнительные требования к кристаллитам, в частности:

- совместимость размеров кристаллитов с расстоянием между зерен;
- узкое распределение частиц по размерам;
- отсутствие кластеризации кристаллитов.

Стеклокерамические материалы характеризуются различными свойствами. Плотность определяют с помощью принципа Архимеда, используя воду или неводный растворитель (например, толуол и ксилол) в качестве иммерсионной жидкости. Тепловые свойства, такие как коэффициент

теплового расширения, температура стеклования, температура деформации стекла и температура кристаллизации стекла, измеряются dilatометром, дифференциальным сканирующим калориметром.

Стекловидная природа или аморфный характер устанавливаются путем записи рентгенограммы. В [13] приведены рентгенограммы, полученные при различных условиях кристаллизации на образцах GC1 (полученные при температуре отжига 900°C), GC2 (при температуре отжига 650°C), GC3 (при температуре отжига 700°C) и соответствующих стеклах (обозначенных как PG1, PG2 и PG3), представлены на рисунке 1.3.

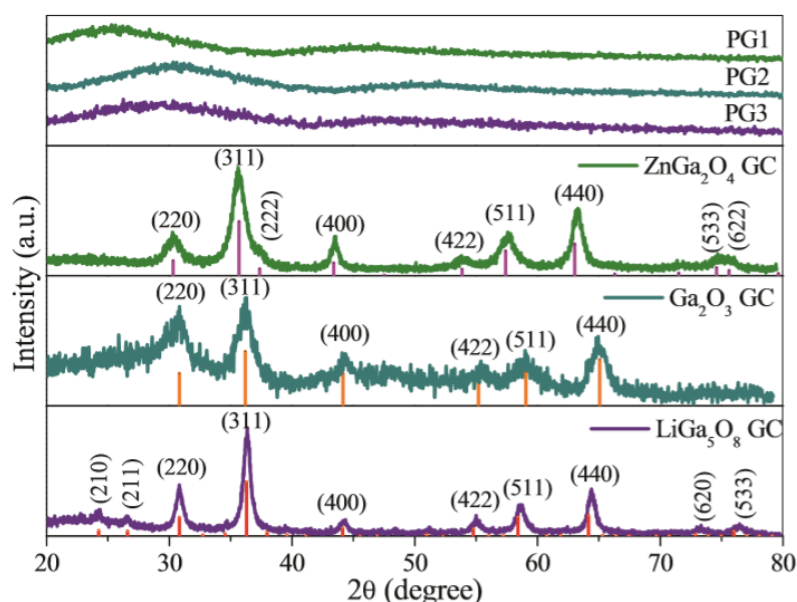


Рисунок 1.3 – Рентгенограммы образцов GC1, GC2, GC3 и соответствующих исходных стекол (PG1, PG2 и PG3). Вертикальные линии, обозначенные под каждым пиком, представляют собой стандартные кубические кристаллы ZnGa_2O_4 (JCPDS № 381240), кубический Ga_2O_3 (JCPDS № 20-0426) и кубический LiGa_5O_8 (JCPDS № 38-1371) соответственно [13].

Исходные стекла иллюстрируют аморфные пики, в то время как после кристаллизации стекла несколько дифракционных пиков, как подписано кубический кристалл ZnGa_2O_4 , кубический Ga_2O_3 появляются в рентгенограмме кривые GC1, GC2 и GC3 соответственно.

Структурные свойства стекла оцениваются методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. В работе [14] исследовалась стеклокерамика состава $\text{CaF}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3$ с Cr_2O_3 в качестве зародышевого вещества. Изученное строение поверхности стеклокерамики C0 (концентрация ионов Cr_2O_3 – 0 вес. %), C1 (концентрация ионов Cr_2O_3 – 0,1 вес. %), C4 (концентрация ионов Cr_2O_3 – 0,4 вес. %) и C5 (концентрация ионов Cr_2O_3 – 0,5 вес. %), полученной на снимках SEM, показано на рисунке 1.4.

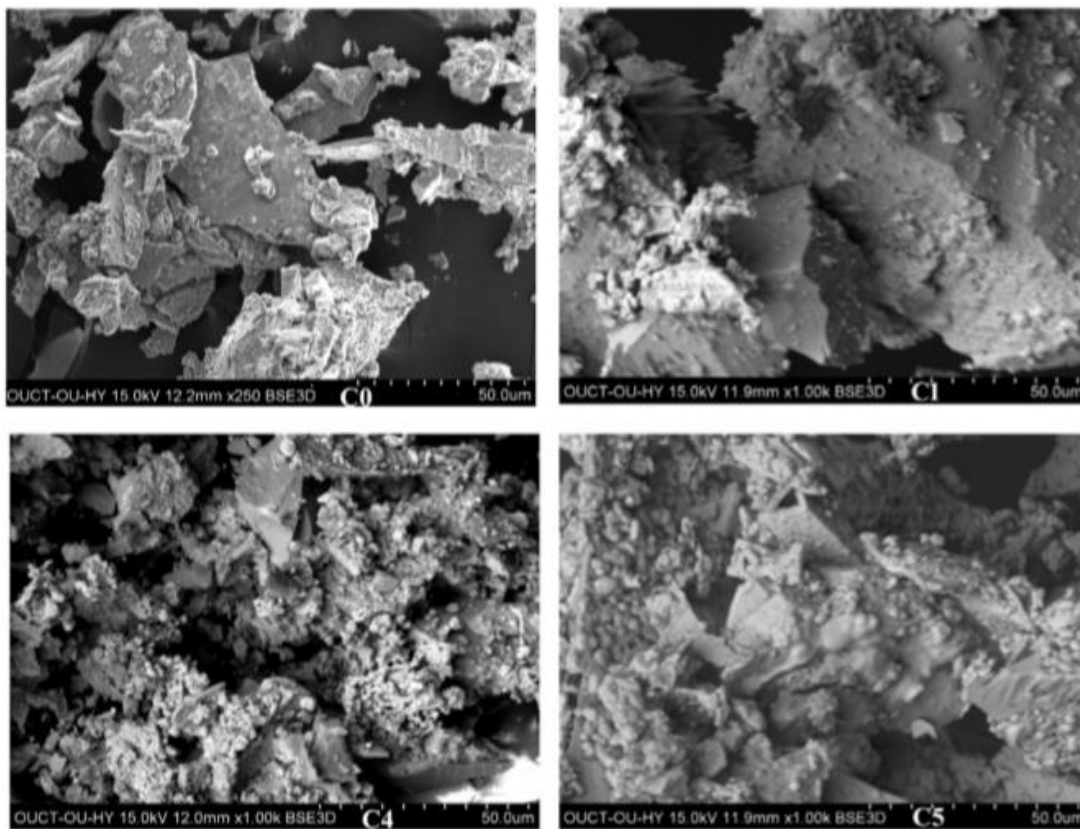
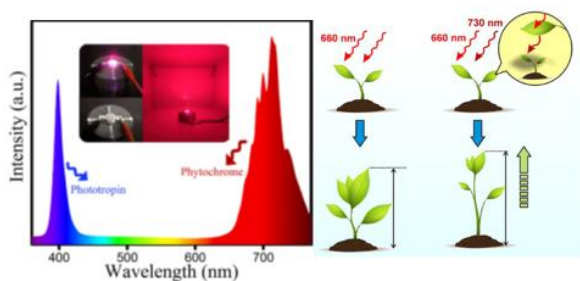


Рисунок 1.4 – СЭМ-изображения некоторых стеклокерамик состава $\text{CaF}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{B}_2\text{O}_3: \text{Cr}_2\text{O}_3$ [14].

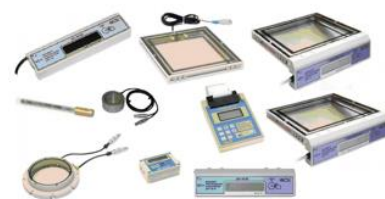
Остаточная аморфная фаза может действовать как взаимосвязанные зоны между кристаллизованными областями, делая керамические образцы свободными от пустот и трещин. Кроме того, изображения также показывают, что с увеличением содержания Cr_2O_3 наблюдается постепенное увеличение объемной доли кристаллитов в образцах. Таким образом, как рентгеновские, так и СЭМ-исследования подтвердили, что термическая обработка привела к

превращению аморфных образцов в стеклокерамику, а увеличение содержания кристаллизующего вещества Cr_2O_3 увеличило концентрацию различных кристаллических фаз в стеклянной матрице.

Практическое применение фотонной стеклокерамики с ионами переходных металлов, благодаря их излучательным переходам в ИК-диапазоне, востребовано в преобразователях частоты, так как необходимо преобразовать ИК/УФ-излучение в видимое. Широкое применение стеклокерамики распространено в таких областях, как персональная дозиметрия, лазерные среды и т.д. (рисунок 1.5).



Излучатель красного света



Персональная дозиметрия



Лазерные среды

Рисунок 1.5 – Области применения стеклокерамических материалов

1.2 Физико-химические свойства оксидных стеклокерамик

Стеклокерамические материалы занимают промежуточное положение между кристаллическими материалами и стеклами, они объединяют в себе лучшие свойства кристаллов (высокая механическая и термическая прочность) и стекол (возможность прессования и формования, возможность формирования элементов различной геометрии). В СК, существует возможность создания вокруг ансамбля ионов-активаторов одновременно и упорядоченного и неупорядоченного окружения. При этом проявляется возможность комбинировать свойства ионов-активаторов в аморфных и кристаллических матрицах и получать совершенно новые люминесцентные материалы. Вклад аморфного и кристаллического окружения в свойства материала в целом можно варьировать посредством контролируемой объемной кристаллизации.

Преимущества данного материала заключаются в следующем: высокая химическая и термическая устойчивость; гибкость варьирования технологических режимов; высокая непроницаемость по отношению к различным газам и влаге; более однородное распределение активатора; экономичность технологии.

Свойства стеклокерамического материала зависят от структуры, которая, в свою очередь, зависит от химического состава. Тепловые и физические свойства стеклокерамики, в основном, зависят от конкретных компонентов исходного стекла, режима термообработки, типа зародышеобразователя, а также вида и количества составов кристаллических фаз. В таблице 1.2 приведены основные свойства и функции стеклокерамических материалов [15].

Таблица 1.2 – Свойства и функции стеклокерамических материалов [15]

| Тип характеристики | Свойство | Функция |
|--------------------|--|---|
| Физический | Плотность | Фундаментальное свойство напрямую влияет на показатель преломления и другие свойства |
| Оптический | Показатель преломления | Контроль траектории светового луча |
| | Рассеивание | 1) Контроль хроматической аберрации; 2) улучшение качества изображения |
| | Поглощение | Контроль прозрачности нелегированных стекол и селективного поглощения легированных (3d и 4f ионами металлов) стекла для ультрафиолетовых до дальних инфракрасных областей электромагнитного спектра |
| Фотонный | Нелинейно-оптическое свойство | Оптическая коммутация и модуляция |
| | Фотолюминесценция и излучение | Поглощение, люминесценция и генерация |
| Тепловой | Коэффициент теплового расширения | Контроль изменения размеров с температурой |
| | Теплопроводность | Переход тепловой энергии через материал |
| Микроструктурный | Строение (размер и форма) и ориентация зерна | Контроль свойств стекол и стеклокерамики |
| Химический | Долговечность | Инертность к окружающей среде или химическим веществам |

1.3 Ионы переходных металлов

Ионы переходных металлов представляют большой интерес в связи с необходимостью использования новых цветных стеклокерамик, которые могут быть использованы в художественных и технологических применениях. Цвета, индуцированные ионами переходных металлов, рассматриваются благодаря d-d- переходам [16].

Характерная особенность переходных металлов обусловлена их способностью образовывать соединения, в которых сохраняется частично заполненная d-оболочка. Именно наличие незаполненной d-оболочки обуславливает как окраску, так и парамагнитные свойства, которым обладают многие соединения переходных металлов. Более того, явление переменной валентности, присущее этим элементам в большей степени, чем другим (за исключением, возможно, лишь актинидов), обусловлено необычными соотношениями, существующими между последовательными потенциалами ионизации d-электронов.

Химическая стабильность и долговечность стеклокерамик может быть улучшена при добавлении оксидов переходных металлов. Переходные металлы обычно используют для увеличения проводимости стеклокерамик [17]. В таблице 1.3 приведена основная информация об элементах 3d-переходного металла [18].

Таблица 1.3 – Атомный номер, символ, название, валентность и внешняя оболочка электронной конфигурации элементов 3d-переходного металла [18]

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu |
| Скандий | Титан | Ванадий | Хром | Марганец | Железо | Кобальт | Никель | Медь |
| +3 | +2, +3, | +2 до +5 | +2, +3, | +2 до +7 | +2, +3 | +2, +3 | +2, +3 | +1, +2 |
| 3d ¹ 4s ² | +4 3d ² 4s ² | 3d ² 4s ² | +4, +6 3d ⁵ 4s ¹ | 3d ⁵ 4s ² | 3d ⁶ 4s ² | 3d ⁷ 4s ² | 3d ⁸ 4s ² | 3d ¹⁰ 4s ¹ |

Примечательно, что самые сильные полосы поглощения, обусловленные $d-d$ -переходами, всегда довольно широки и обычно не имеют никаких следов тонкой структуры, имеется большое число ионов, которые кроме этих полос имеют также слабые узкие полосы поглощения, иногда почти такие же узкие, как и атомные спектральные линии. Наиболее ярким примером может служить ион Cr^{3+} , спектр оптического поглощения которого обычно состоит из двух широких полос и нескольких очень резких.

Слабая интенсивность линий заставляет предположить, что они связаны с переходами, запрещенными по мультиплетности, что и подтверждается детальными расчетами. Однако некоторые переходы, запрещенные по мультиплетности, дают столь же широкие полосы, как и разрешенные переходы. Необходимо объяснить, почему некоторые, но не все полосы, запрещенные по спину, узки, в то время как все полосы, разрешенные по спину, широки. Основная причина этого различия связана с принципом Франка–Кондона. Все переходы, разрешенные по спину, включают перенос электронов с орбит t_{2g} на e_g и поэтому приводят к возбужденным состояниям, у которых равновесные межъядерные расстояния больше, чем для основного состояния.

Таким образом, ион металла в его возбужденных состояниях, взаимодействует с окружением иначе, чем тот же ион в основном состоянии. Если окружения в какой-то степени изменяется, что имеет место в растворах, то энергия перехода зависит от мгновенных положений соседних молекул, и, следовательно, сама немного изменяется. Это приводит к расширению полосы поглощения. Молекула переходит в колебательно-возбужденное состояние. В этом случае многие линии, соответствующие различным электронно-колебательным переходам, расположены настолько близко друг от друга, что их невозможно различить, и переход порождает в спектре широкую полосу, а не линию [17].

Для ионов с конфигурацией d^3 , например Cr^{3+} , низшие дублетные состояния, как и основное состояние, имеют три электрона на орбите t_{2g} .

В таких случаях взаимодействие иона с его окружением может измениться во время перехода, и, следовательно, обе причины приводящие к уширению полосы, могут исчезнуть, тогда появляются очень узкие линии.

Положение полос поглощения ионов 3d-переходного металла в стеклах зависят от нескольких факторов, таких как:

- химический состав стекла;
- концентрация и сочетание 3d оксидов переходных металлов в стекле;
- температура и длительность плавления стекла;
- объем расплавленного (подготовленного) стекла на расплав;

Поэтому для успешной функционализации стекол путем легирования 3d-ионами переходного металла необходимо контролировать и учитывать все вышеперечисленные факторы. Среди рассмотренных выше ионов переходных металлов, ионы Cr^{3+} с электронной конфигурацией $3d^3$ являются наиболее важными для широкого спектра практических применений [19, 20].

Ионы Cr^{3+} очень важны из-за высокой чувствительности их оптических спектров к природе матрицы-стекла. Поэтому ионы Cr^{3+} очень актуальны для получения дополнительной информации об аморфной локальной среде в стеклах [21 - 23]. В конкретном случае свечение ионов Cr^{3+} возникает из-за переходов в незаполненную 3d-электронную оболочку. Такие переходы Лапорта запрещены в узлах, имеющих центр симметрии. Обозначения переходов в Cr^{3+} в октаэдрической симметрии были разработаны в классической работе Танабе и Сугано.

На рисунке 1.6 представлено описание поля лигандов энергетического уровня Cr^{3+} в октаэдрической форме: слева - члены Рассела-Сондерса для свободного Cr^{3+} , а справа - теоретические обозначения групп для узлов симметрии. Горизонтальная переменная - Δ/B , отношение разности энергий подоболочки Δ к параметру Racah B. Δ измеряется $10Dq$, значением нулевой фононной линии перехода ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ в спектрах поглощения или возбуждения, но, как это ни странно, чтобы сохранить структуру спектра поглощения, авторы берут волновое число максимальной интенсивности широкой полосы.

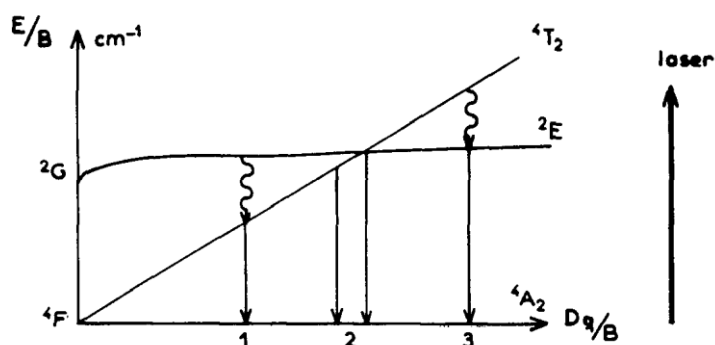


Рисунок 1.6 - упрощенная диаграмма Танабе-Сугано для иона Cr^{3+} [24]

Показано два первых возбужденных состояния, возникающих в механизме флуоресценции:

- 1 – слабое кристаллическое поле
- 2 – промежуточный кристалл
- 3 – сильное кристаллическое поле

На этой диаграмме как основное состояние 4A_2 , так и возбужденное состояние 2E возникают из нижнего набора d-орбиталей $(t_2)^3$, тогда как 4T_2 принадлежит $(t_2)^2 (e)^1$. В запрещенном по спину переходе ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ геометрия электронных орбиталей не изменяется, и положение равновесия и возбужденной конфигурации частично не изменяется, исключая любое стоксово смещение между спектрами поглощения и излучения [24].

С другой стороны, разрешенный переход ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ возникает из набора e в набор t_2 . Поскольку электронные орбитали направлены вдоль осей октаэдра в направлении трех лигандов, электростатическое отталкивание в возбужденном состоянии вызывает нарушение и увеличение равновесного межъядерного расстояния между Cr^{3+} и лигандами. Расширение электронной функции приводит к ее гораздо более сильному взаимодействию с колебательными модами. Этот переход особенно чувствителен к окружающей среде, поскольку силы связи электронов с решеткой варьируются от сильных до слабых. Соответственно, оптические свойства будут сильно варьироваться от одного материала к другому. Cr^{3+} обычно считается симметрическим с определенными искажениями в оксидных стеклах. Осевые искажения

симметрии вызывают расщепление возбужденных. Уровень 2E и фундаментальный уровень 4A_2 на две составляющие: первая на несколько десятков см^{-1} , а вторая менее чем на 1 см^{-1} .

Также очень важный момент об уровнях энергии Cr^{3+} , участвующих в процессах свечения. Уровни 4T_2 и 2E затухают с общей постоянной времени [24]:

$$\tau^{-1} = \frac{A({}^2E) + \frac{g_2}{g_1} \cdot A({}^4T_2) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right)}{1 + \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right)};$$

$A({}^2E)$ и $A({}^4T_2)$ - вероятности излучения возбужденных состояний 2E и 4T_2 соответственно с $A({}^2E) \leq A({}^4T_2)$;

g - степень вырождения уровней, g_1 для 2E и g_2 для 4T_2 ;

ε - разность энергий между низшими колебательными уровнями возбужденных уровней 4T_2 и 2E .

Таким образом, если происходит тепловое равновесие, затухание люминесценции не может быть использовано для распознавания каждого из уровней 4T_2 или 2E в промежуточном кристаллическом поле. В большинстве случаев профили распада различаются из-за другого механизма, как, например, перенос энергии между возбужденными конфигурациями различных ионов Cr^{3+} . В основном постоянная времени t сильно зависит как от температуры, так и от параметра ε . Параметр ε можно оценить по температурной зависимости t или интенсивности флуоресценции, приходящейся от каждого возбужденного уровня.

С помощью трехвалентного хрома можно получить стекло с оттенком зеленого цвета, содержащее октаэдрический комплексный ион $[\text{CrO}_6]_3$ с гибридизацией d^2sp^3 . В случае с элементом Cr^{2+} , который относится к системе $3d^4$, удастся синтезировать стекло бледного или голубого цвета. В работе [25] продемонстрировали спектры поглощения ионов Cr^{3+} , Cr^{4+} и Cr^{6+} в натриево-кальциево-силикатных и кальций-алюминатных стеклах.

Однако к особенностям хрома относится то, что он может находиться в нескольких валентных и координационных состояниях в одной кристаллической матрице, что сильно влияет на люминесцентные свойства, и поэтому выбор матрицы для ионов является актуальной задачей.

1.4. Оптические и люминесцентные свойства стеклокерамик, активированных ионами хрома

Большой интерес для современной элементной базы фотоники, представляют прозрачные стеклокерамические (СК) материалы. Такие материалы предназначены для преобразования УФ- или ИК-излучения в видимое излучение, в практике применяются, как преобразователи частоты. Люминесцентные свойства СК материалов, активированных переходными металлами, как правило, наблюдаются в видимом спектральном диапазоне. Характеристики свечения оптических СК, такие как квантовый выход, спектр излучения, кинетические параметры затухания люминесценции, зависят от множества факторов: методы и режимы синтеза, особенности микроструктуры СК; тип, количество и распределение дефектов (центров люминесценции) и допантов. Упрощенная диаграмма уровней энергии для трехкратно ионизованного хрома в кристалле рубина показана на рисунке 1.7. Когда этот материал облучается энергией на длине волны около 5500 А, ионы хрома возбуждаются до состояния 4F_2 и затем быстро теряют часть своей энергии возбуждения из-за безызлучательных переходов в состояние 2E [26].

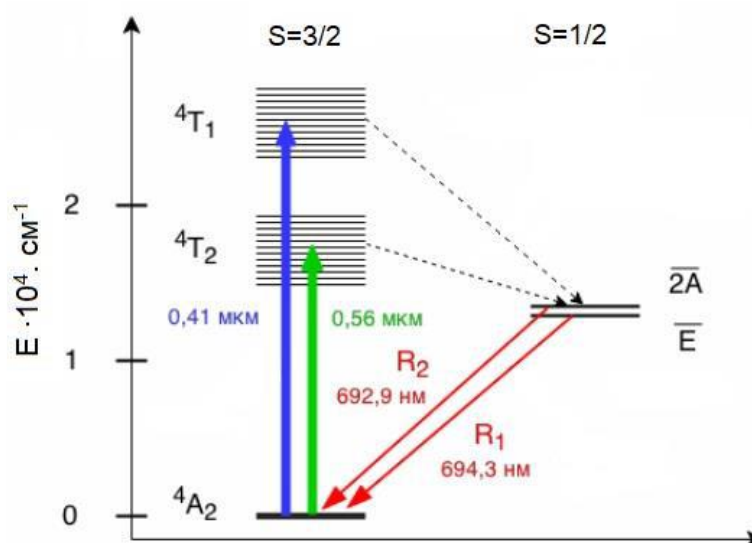


Рисунок 1.7 – Схема энергетической структуры иона Cr^{3+} в лазерном кристалле рубина [26]

На рисунке 1.8 приведены спектры оптического поглощения образцов стеклокерамики $\text{CaF}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5\text{--B}_2\text{O}_3\text{:Cr}_2\text{O}_3$, представленные в работе [14]. В спектрах зафиксированы две полосы поглощения, обусловленные ионами Cr^{3+} при длине волны 457 и 639 нм, что соответствует переходам ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}(\text{F})$ и ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}(\text{F})$. В этих спектрах также можно наблюдать два пика на длине волны около 663 и 690 нм соответствующие переходам ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^2\text{T}_{1g}$ и ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^2\text{E}_g$. Эти полосы обусловлены спин-запрещенными переходами. С увеличением концентрации зародышеобразователя Cr_2O_3 наблюдается уменьшение интенсивности пиков поглощения. Такое снижение свидетельствует о снижении концентрации ионов Cr^{3+} (возможно, вследствие окисления этих ионов в состояние Cr^{6+}). В спектрах также присутствовала полоса переноса заряда, обусловленная ионами Cr^{6+} , около 370 нм в спектрах всех образцов (вставка на рисунке 1.8).

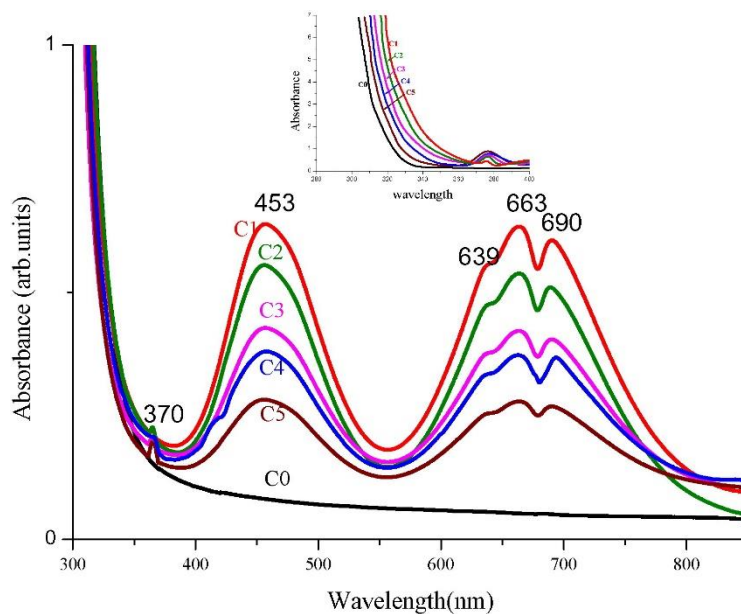


Рисунок 1.8 – Оптические спектры поглощения стеклокерамики $\text{CaF}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5\text{--B}_2\text{O}_3\text{:Cr}_2\text{O}_3$. На вставке показаны границы поглощения стеклокерамики, легированной хромом.

В процессе синтеза материала можно варьировать параметры приготовления, как в работе [29], где легированные хромом образцы стеклокерамики были изготовлены с различной длительностью плавления.

Оцененные размеры кристаллитов в синтезированных образцах составляют от десятков нанометров (в случае керамизирования при 570–650°C в течение 2 ч) до десятков микрон (дополнительная термическая обработка при 900°C в течение 5 мин). В результате исследования спектров поглощения нужно отметить, что уменьшение концентраций ионов Cr^{6+} и Cr^{3+} в стекле с увеличением продолжительности плавления не является таким: содержание Cr^{6+} самое меньшее, в пять раз в образце №1 (продолжительность плавления 30 мин), тогда как соответствующее уменьшение содержания Cr^{3+} менее чем в два раза (рисунок 1.9).

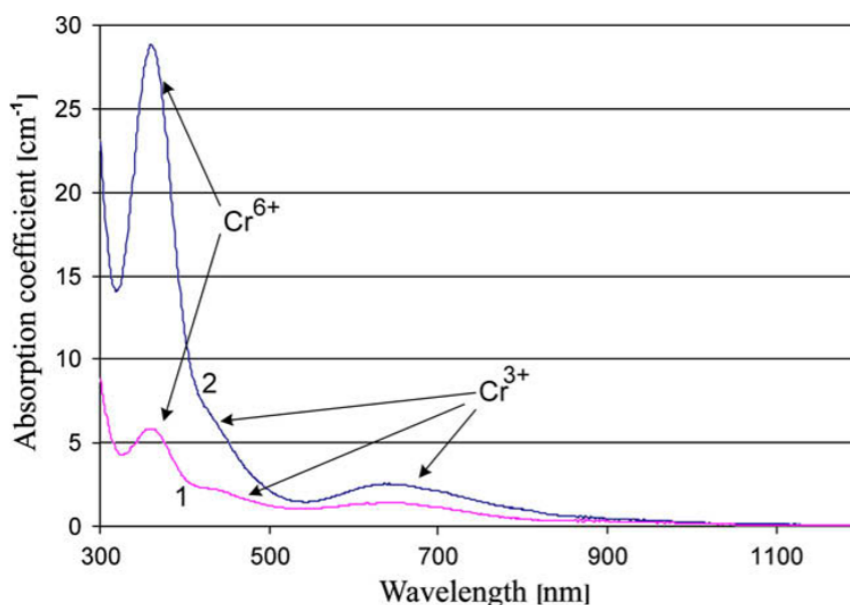


Рисунок 1.9 – Спектры поглощения двух образцов с различной продолжительностью плавления: №1, 30 мин; № 2, 3 мин [29]

Изменения в процессе синтеза образцов также оказывают влияние на оптические свойства материала. В данном случае при длительном плавлении коэффициент поглощения ниже, чем у образца №2 (продолжительность плавления 3 мин).

В работе [27] исследовались люминесцентные свойства тетраборатной стеклокерамики с переменной составляющей ионов хрома (рисунок 2). В спектре фотолюминесценции наблюдались широкие и узкие полосы, но нужно отметить, что при значении концентрации ионов Cr^{3+} , равном

1,6 вес. %, интенсивность излучения гораздо выше, чем у образцов с меньшей концентрацией ионов хрома. Соответственно, концентрация ионов хрома влияет на интенсивность излучения образцов, тем самым улучшая их люминесцентные свойства.

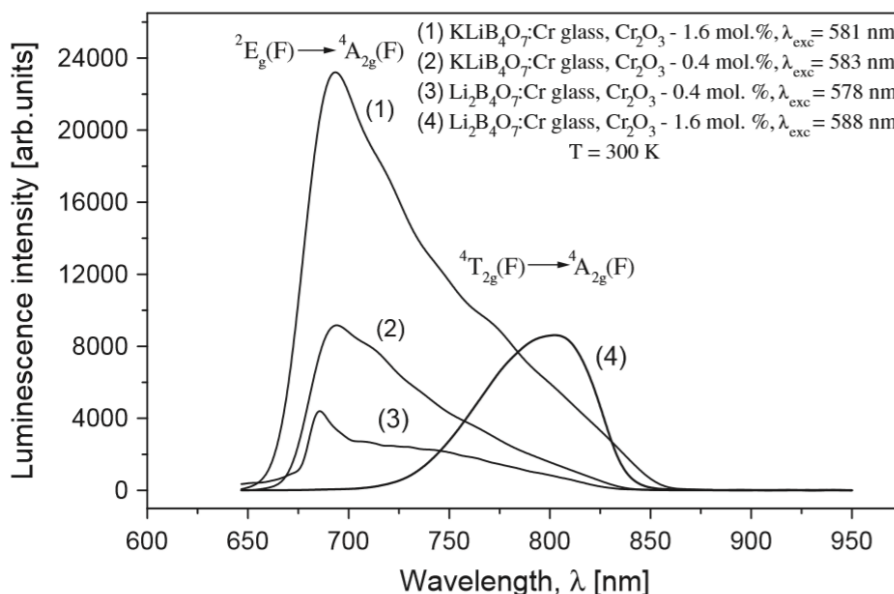


Рисунок 2 – Спектры люминесценции стекол, легированных Cr, в составе KLiB₄O₇: Cr (1, 2) и Li₂B₄O₇: Cr (3, 4), содержащими 1,6 (1, 4) и 0,4 (2, 3) мол. % Cr₂O₃ при T = 300 K [27]

В [28] стекло состава 2CaO – Ge₂O₃ – Li₂O₃ – 0.5B₂O₃ – 0.2Al₂O₃ не излучает при 900 нм (типично для центров Cr³⁺), а также при 1200–1300 нм (типично для тетраэдрического Cr⁴⁺). Причина - сильное безызлучательное тушение, которое можно найти во многих других стеклах. После термообработки при температурах выше 450-500°С появляется полоса флуоресценции с максимумом при 1280 нм. На рисунке 2.1 (а) приведены спектры флуоресценции при возбуждении при 670 нм, зафиксированные при комнатной температуре и температуре ниже комнатной.

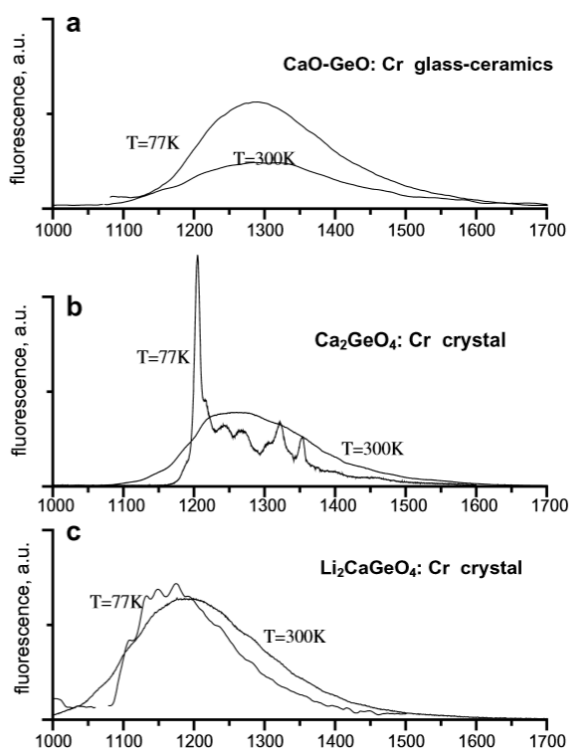


Рисунок 2.1 – Спектры флуоресценции при возбуждении $\lambda = 670$ нм измеренные при комнатной температуре (а) $2\text{CaO}-\text{Ge}_2\text{O}_3-\text{Li}_2\text{O}_3-0,5\text{B}_2\text{O}_3-0,2\text{Al}_2\text{O}_3$; (б) Cr: монокристалл Ca_2GeO_4 ; и (с) Cr: $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$ монокристалл [28]

Максимум полосы флуоресценции находится на 1300 нм. Причиной появления флуоресценции после термообработки является образование кристаллитов в стекле. Кристаллиты проявляют гораздо меньшее безызлучательное гашение по сравнению со стекляной фазой.

В [30] представлены спектры фотолюминесценции (рисунок 2.2) прозрачной поликристаллической керамики $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Cr}^{3+}$, предварительно спеченной при 1380°C с различными концентрациями легирующей примеси. Излучения гораздо меньшей интенсивности (боковые полосы) также наблюдались на стоксовой и антистоксовой сторонах R-линий при 658, 669, 675, 680, 707, 713 нм.

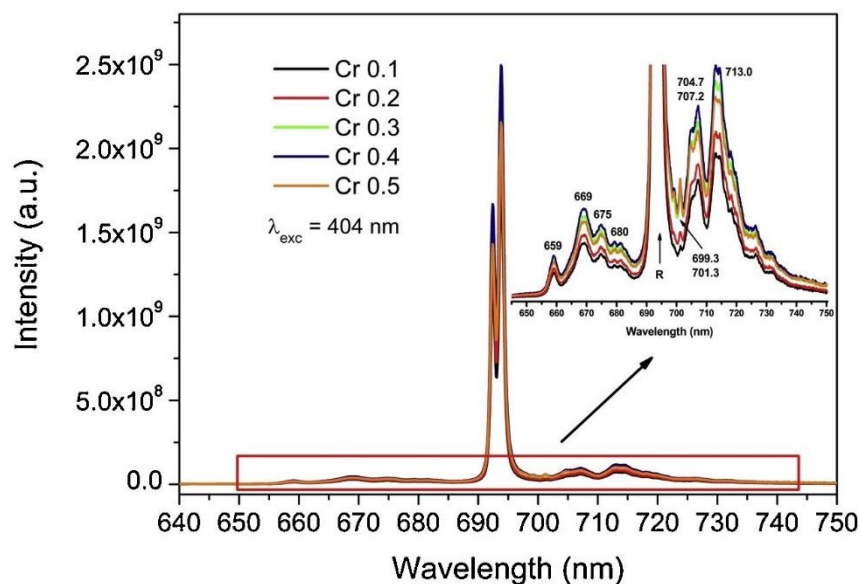


Рисунок 2.2 – Спектры фотолюминесценции Al_2O_3 стеклокерамики с различной концентрацией Cr^{3+} (0,1 - 0,5 мол. %) при возбуждении на длине волны, равной 404 нм [30]

Слабые острые линии, называемые N-линиями, наблюдаемые при 699,3, 701,3, 704,2 нм, указывают на присутствие пар Cr-Cr и могут быть связаны с излучением связанных пар ионов Cr, тогда как боковые полосы, более короткие / более длинные волны с более широкими полосами вокруг R-линий, связаны с фононными переходами, обусловленными электрон-фононным взаимодействием в изолированных местах. Вставка на рисунке 2.2 представляет увеличенную область N-линий и полос низкой интенсивности в спектральном диапазоне от 650 нм до 740 нм.

Также в данной работе [30] кинетики затухания люминесценции были записаны при возбуждении импульсной Хе-лампой (рисунок 2.3) при комнатной температуре. Образцы возбуждались при 404 нм.

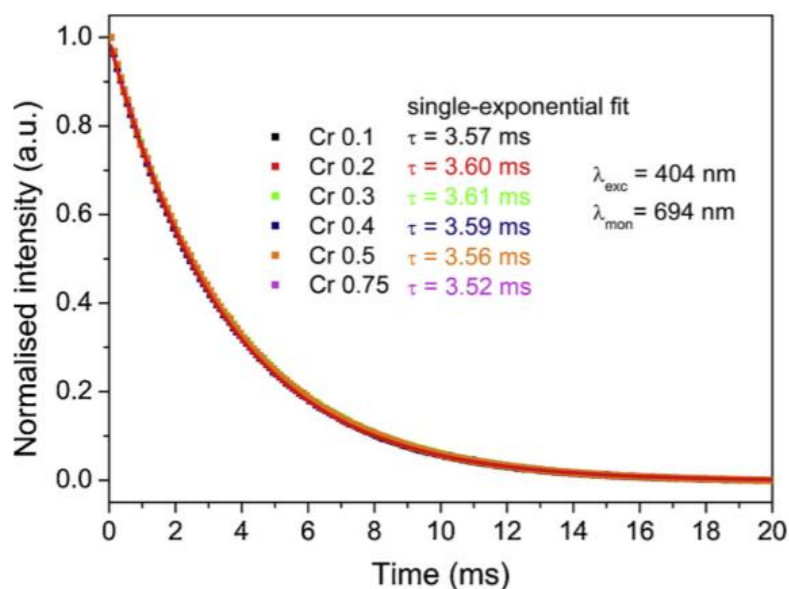


Рисунок 2.3 – Кинетика затухания люминесценции стеклокерамики $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ с различной концентрацией Cr^{3+} (0.1–0.5 вес. %). [30]

Значения времени жизни образцов, предварительно спеченных при 1390°C , были практически идентичны значениям времени жизни образцов, спеченных при 1380°C для конкретной концентрации легирующей примеси, режим предварительного спекания не влиял на динамику свечения в подготовленных образцах. Кривые затухания люминесценции демонстрируют одноэкспоненциальное поведение со временем затухания $\sim 3,6$ мс, аналогично монокристаллу рубина.

При анализе результатов экспериментов о времени затухания люминесценции стеклокерамики, активированной ионами трехвалентного хрома, имеет общую особенность – быструю и медленную компоненту. Наибольший вклад быстрой компоненты наблюдается для нанокристаллов. Вклад быстрого и медленного компонента для монокристалла и керамики близок.

Выводы по главе 1

В главе 1 был проведен анализ литературных данных и показано, что на данный момент проведено большое количество исследований различных хромосодержащих кристаллов, стекол и стеклокерамик. Стеклокерамика является подходящей матрицей для активирования различными ионами переходных металлов благодаря набором оптимальных физико-химических свойств. Переходные металлы используются для активации подобных матриц, обусловлено это тем, что у переходных металлов присутствует серия излучательных переходов, сосредоточенная в ИК-диапазоне. На сегодняшний день стеклокерамика является перспективным материалом для фотонных применений

Глава 2. Объекты и методы исследования

2.1 Исследуемые образцы алюмоборатной стеклокерамики, активированной ионами хрома

2.1.1 Серия образцов с переменной концентрацией хрома

Синтезированы боратные стеклокерамики состава $K_2O-Li_2O-Al_2O_3-B_2O_3$, легированные различной концентрацией ионов хрома. Состав исследуемых образцов приведен в таблице 2.1.1. Исходный синтез стекла осуществляли методом закалки расплава с использованием высокочистых соединений в высокотемпературной печи при температуре $1400^{\circ}C$ в тиглях в течение 1 ч. расплав стекла перемешивали с платиновой стержневой мешалкой. После этого расплав выливали в форму из нержавеющей стали, а затем отжигали при температуре $400^{\circ}C$ в муфельной печи. Хром был введен в шихту в качестве химически чистого оксида хрома Cr_2O_3 различной концентрации (0.03; 0.05; 0.07; 0.1; 0.15 вес. %). Условия формирования нанокристаллической фазы в условиях низкой концентрации хрома были улучшены введением соединений фтора $((NH_4) HF_2)$. Степень окисления хрома контролировалась введением соединений сурьмы (Sb_2O_3). На рисунке 2.1.1 представлены синтезированные образцы.

Таблица 2.1.1 – Состав серии образцов с переменной концентрацией хрома, вес. %

| Компонент | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Li₂O | 4.78 | 4.78 | 4.78 | 4.78 | 4.78 |
| K₂O | 15 | 15 | 15 | 15 | 14.98 |
| Al₂O₃ | 32.58 | 32.57 | 32.57 | 32.56 | 32.55 |
| B₂O₃ | 44.51 | 44.5 | 44.48 | 44.47 | 44.45 |
| Cr₂O₃ | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.1 | 0.15 |
| Sb₂O₃ | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 0.96 |
| F | 2.13 | 2.13 | 2.13 | 2.13 | 2.13 |

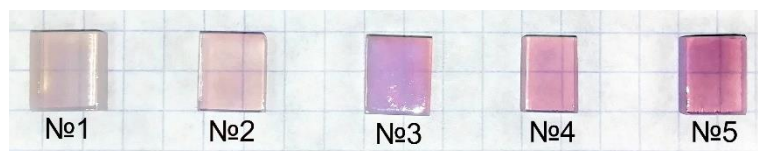


Рисунок 2.1.1 – Серия образцов с переменной концентрацией ионов хрома

2.1.2 Серия образцов с переменной длительностью отжига

Исходное алюмооборатное стекло имело следующий химический состав: $K_2O-Li_2O-Al_2O_3-B_2O_3$. Стекланную партию взвешивали с точностью 0,001%, а затем тщательно перемешивали. Синтез исходного стекла проводили по стандартной методике закалки расплава в высокотемпературной печи при температуре 1400°C в тиглях в течение 1 часа, перемешивали расплав стекла с помощью платиновой стержневой мешалки. После этого расплав закачивали в форме из нержавеющей стали при комнатной температуре и затем окончательно охлаждали при температуре 430°C в муфельной печи. Хром вводили в шихту в трехвалентной форме через оксид хрома Cr_2O_3 . В таблице 2.1.2 представлен состав алюмооборатной стеклокерамики с переменной длительностью отжига.

В данном случае проводилась многоступенчатая термообработка: первая стадия термообработки стекла проводилась при температуре 450°C, (близкой к температуре стеклования), с целью создания множественного ядра кристаллической фазы, а продолжительность 10 ч; вторая стадия выдерживалась при 600°C в течение различного времени отжига, а именно: 10, 20, 30 и 720 мин. На рисунке 2.1.2 представлены полученные образцы.

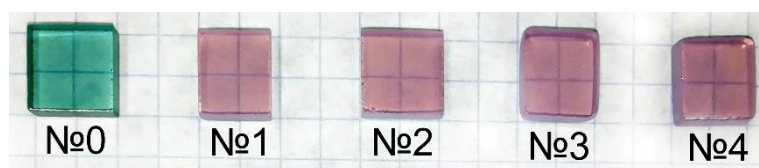


Рисунок 2.1.2 – Образцы с переменной длительностью отжига

Таблица 2.1.2 – Состав алюмооборатной стеклокерамики с переменной длительностью отжига

| Состав | Матрица, вес. % | Первый этап | Второй этап | | Обозначение |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------|
| | | | Температура, °С | Длительность, мин | |
| Li ₂ O | 12,5 | 450°С 10 часов | 600°С | 0 | 0 |
| Al ₂ O ₃ | 12,5 | | | | |
| K ₂ O | 25 | | 600°С | 10 | 1 |
| B ₂ O ₃ | 50 | | | | |
| Добавки сверх 100 вес. % (вес. %) | | | 600°С | 20 | 2 |
| Sb ₂ O ₃ | 1 | | 600°С | 30 | 3 |
| | | | 600°С | 60 | 4 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,075 | | 600°С | 120 | 5 |
| (NH ₄)HF ₂ | 3,3 | | 600°С | 720 | 6 |

2.2 Методы исследования

2.2.1 Структурный анализ при использовании рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu)

Дифрактометр представляет собой сферу, в которую попадает излучение, оно отражается, на ПК можно наблюдать картинку, каждый пик в трехмерном пространстве представляет собой конус. Дифрактометр состоит из трех основных частей: рентгеновская трубка, детектор, гониометр.

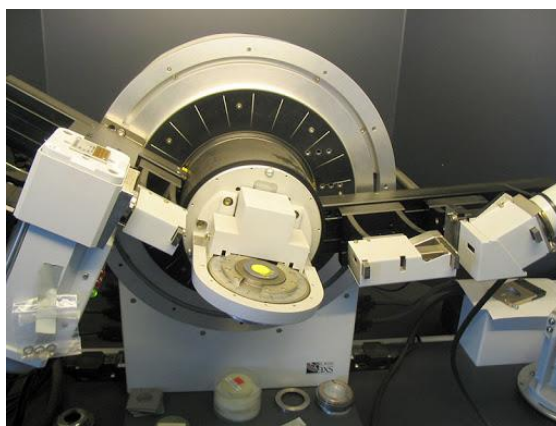


Рисунок 2.2.1 – Рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu)

Рентгеновская трубка испускает излучение. Рентгеновские трубки могут отличаться по виду излучения. В данном случае медный анод, т.е. будет медное излучение, соответственно длина волны $1,54\text{\AA}$. Медные трубки проще получить и у них низкая себестоимость. Если в качестве образцов будут стали, железа, то медное излучение большое переизлучение имеет в материале, т.е. много раз отражается и итоге получается дифрактограмма слабой интенсивности. Детектор принимает отраженное излучение. В данном случае используется полупроводниковый детектор.

С помощью гониометра можно с большой точностью перемещать рентгеновскую трубку. Самая дорогая часть установки – гониометр. Дифракция – это отклонение от геометрических законов на щелях. Анализируя, в каких областях находятся пики, можно понять, что это за вещество или соединение и какими оно обладает параметрами.

Образец крепится в держателе. Образец всегда нужно закреплять таким

образом, чтобы он был плоскопараллельно проходу пучка. Для этого используется пластилин. Для того, чтобы избавиться от остатков пластилина на образце используют ацетон. Строгое соблюдение плоско параллельности необходимо для того, чтобы пучок не отражался в разные стороны, и чтобы не было смещения дифракционной картины, т.к. смещение дифракционной картины влияет на качество структурных параметров. Т.к. длина волны $1,54\text{\AA}$, а расстояние между слоями в атомной решетке $\approx 2\text{\AA}$, то излучение уже просвечивает кристаллы. Визуально это невозможно наблюдать.

Для того чтобы получить качественную рентгенограмму необходимо набрать статистику измерений. Соответственно нужно увеличить скорость фиксации картины. С помощью интенсивной дифрактограммы можно провести детальный анализ о структуре материала, но для этого нужно усилить излучение. Вследствие этого на анод бомбардируется большое количество электронов, что может привести к его разрушению.

В режиме реального времени можно наблюдать результат эксперимента. Пики – это направления, в которых выстроены атомы, от которых отражается рентгеновское излучение. Анализируя данные пики, можно судить о структуре образца.

2.2.2 Регистрация спектров ИКЛ на базе оптоволоконного спектрометра AvaSpec

Регистрация интегральных спектров свечения ИКЛ осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-2048. Измерительный модуль AvaSpec-2048 высокочувствительного спектрофотометра построен на базе AvaBench-75 платформы с симметричной оптической скамьей Черни-Тёрнера и 2048 элементной CCD детекторной матрицы, работающей в спектральном диапазоне 200 – 1100 нм с обратной линейной дисперсией 1,2 нм/мм.

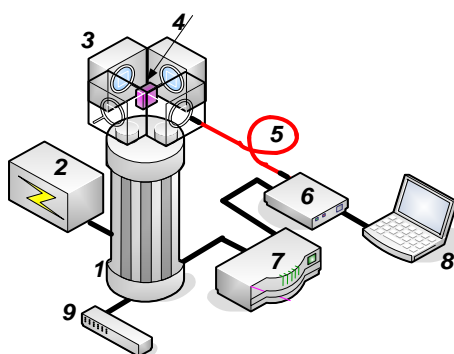


Рисунок 2.2.2 – Блок-схема установки для измерений интегральных спектров «за один импульс»: 1 – импульсный наносекундный сильноточный ускоритель электронов; 2 – блок питания ускорителя; 3 – измерительная камера; 4 – исследуемый образец; 5 – кварцевое оптоволокну; 6 – спектрометр AVANTES AvaSpec 2048; 7 – генератор импульсов ГИ – 1; 8 – ПК; 9 – пульт управления.

Измерение интегральных спектров свечения при импульсном электронном возбуждении осуществлялось в следующей последовательности (рисунок 2.2.2):

1) После закрепления образца (4) в держателе, откачки воздуха из измерительной камеры (3) производится запуск ускорителя (1).

2) Непосредственно перед выходным окошком измерительной камеры на оптической оси, располагается кварцевое оптоволокну (5) которое с помощью SMA стандартного коннектора соединено с входным разъемом спектрометра AvaSpec 2048.

3) Запуск спектрофотометра осуществлялся после запуска ускорителя. Синхронизация осуществляется с помощью внешнего генератора импульсов ГИ-1 (7), спектрометр ожидает внешнего триггерного импульса и начинает измерение после получения внешнего триггерного сигнала с временной задержкой перед началом сканирований, величина которой определяется пользователем. В этом случае, спектрометр будет ожидать нового внешнего триггерного импульса для каждого последующего измерения.

4) Образец облучается импульсом ускоренных электронов и в нем накапливается определенное количество поглощающих излучение дефектов (центров окраски), реализуются процессы люминесценции.

5) Свечение регистрируется в предварительно заданном с помощью программного обеспечения «временном окне» (от 1 мс до 60 сек.). В спектрометрах AvaSpec, построенных на базе платформы USB2, реализована возможность задания времени запаздывания начала измерения, относительно момента вспышки источника излучения или импульса лазера. Таким образом, можно установить время запаздывания старта измерения относительно внешнего сигнала.

6) 2048-ми элементный профиль спектрального распределения с CCD детекторной матрицы снимается микропроцессорно, управляемой электронной платой спектрофотометра и по интерфейсу USB передаётся в ПК, где с помощью специального программного обеспечения, полученные спектральные данные отображаются в режиме реального времени.

Высокая точность спектральных измерений свечения может быть реализована тогда, когда излучательные характеристики исследуемого образца и чувствительность приёмника излучения изменяются незначительно за достаточно длительное время проведения эксперимента.

2.2.3 Методика импульсной катодOLUMИнесцентной спектРометрии наносекундным временным разрешением

Исследования характеристик свечения исследуемых образцов люминофоров проводилось на импульсном оптическом спектрометре, на базе ускорителя электронов ГИН-600 [31]. Импульсный спектрометр позволяет проводить измерения спектрально-кинетических параметров люминесценции оптических материалов после возбуждения СЭП или импульсами лазерного излучения, а также при последовательном электронном и лазерном возбуждении [32].

Возбуждение материалов осуществляется в вакууме при давлении остаточных газов 10^{-4} Па. Технические возможности спектрометра: спектральная область измерений – 200...1200 нм; временное разрешение – ~ 7 нс; температурный диапазон измерений – 12,5...700 К; длительность импульса тока электронов – 2-10 нс; плотность тока пучка электронов – 0,1...1000 А/см²; максимальная энергия электронов – 400 кэВ, средняя – 0,25 МэВ.

В качестве источника возбуждения кристаллов был использован импульсный ускоритель электронов прямого действия. Устройство ускорителя детально описано в [33]. Ускоритель состоит из ГИНа, собранного по схеме Аркадьева-Маркса, вакуумного диода, блока питания и выносного пульта управления. Ускоренные в промежутке катод-анод электроны через металлическую сетку анода выводятся в криостат и облучают образец. Рассеяние электронов, необходимое для равномерного облучения образцов, достигается размещением на пути пучка алюминиевой фольги толщиной ~ 30 мкм. Изменение флюенса электронов в широком диапазоне осуществляется применением набора располагающихся на пути пучка калиброванных диафрагм.

Общий вид спектрометра показан на рисунке 2.2.3. Исследуемый образец (4) обычно с размерами в виде плоской пластинки помещается в пазы

медного кристаллодержателя и прижимается к полированной поверхности. Образец облучается электронным пучком ускорителя (1) через прикрепленные к экранам и держателю тонкие алюминиевые фольги.

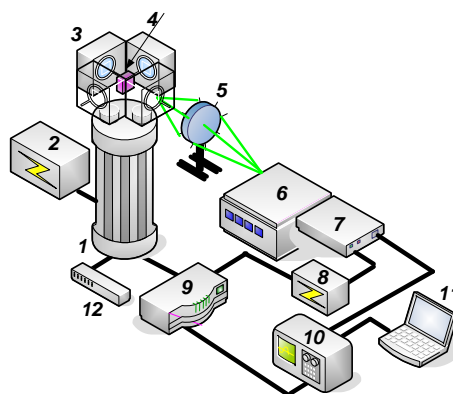


Рисунок 2.2.3 – Блок схема импульсного оптического спектрометра 1 – импульсный наносекундный сильноточный ускоритель электронов; 2 – блок питания ускорителя; 3- измерительная камера; 4 - исследуемый образец; 5 – линзовая система; 6 – монохроматор; 7– фотоэлектронный умножитель; 8- блок питания фотоэлектронного умножителя; 9- генератор импульсов ГИ-1 10– осциллограф; 11 – ПК; 12 - пульт управления

Свет от образца (4) с помощью системы кварцевых линз (5) фокусируется на входную щель монохроматора (6). Излучение, прошедшее через монохроматор (6), регистрируется ФЭУ (7). Электрический сигнал с ФЭУ подается на цифровой осциллограф (10). Срабатывание блоков спектрометра происходит в следующей последовательности. С пульта управления (12) производится включение блока питания ускорителя (2). При достижении заданного зарядного напряжения на ступенях ГИНа с блока питания выдаётся импульс на запуск многоканального генератора импульсов ГИ-1 (9). Генератор запускает ускоритель электронов (1). Регулировка задержек управляющих импульсов с ГИ-1 позволяет включать все элементы спектрометра в любой последовательности.

Спектры люминесценции восстанавливались из осциллограмм изменения интенсивности свечения $I(t)$ образцов со временем при различных

длинах волн после облучения единичным импульсом электронов. Измеренная кинетика затухания оцифровывалась и анализировалась. Обработка полученных экспериментальных данных производилась в программном пакете Origin Pro 8.0.

При измерении сигналов с наносекундными фронтами сопротивление входа регистрирующего устройства (осциллографа) должно быть согласовано с волновым сопротивлением соединительных кабелей и разъемов, т.е. необходимо применение низкоомных согласующих сопротивлений (≈ 50 Ом). Напряжение, подаваемое в импульсе на ФЭУ, регулируется в пределах 1-2 кВ. Линейность ФЭУ контролировалась по изменению анодного тока в зависимости от освещенности катода. Регистрация кинетики затухания люминесценции в диапазоне времен 10^{-5} – 10^{-1} с, проводилась с помощью ФЭУ, запитываемых постоянным напряжением.

Калибровка измерительного тракта производилась по методике, подробно описанной в [32], с помощью стандартных источников света (лампа ТРШ-2850 в видимой области, ДДС – в ультрафиолетовой области). Все измеренные спектры скорректированы на спектральную чувствительность измерительного тракта.

Погрешность измерения люминесценции в значительной мере зависит от нестабильности параметров электронного пучка, разброс которых составляет 5-10%. Определенное влияние оказывают высокочастотные шумы измерительной аппаратуры и ускорителя. С целью уменьшения систематической погрешности, во-первых, подбирались оптимальные режимы облучения и регистрации, во-вторых, применялись защитные экранирующие свинцовые пластины. Для снижения величины случайной погрешности, обусловленной, в основном, нестабильностью параметров СЭП, применялись статистические методы. Так, при трехкратном измерении одной и той же величины (интенсивности свечения, оптической плотности и др.) ошибка измерения уменьшается до 6% (с доверительной вероятностью 0,9).

Параметры кинетики затухания определялись из анализа зависимости $I(t)$. Проводился анализ кинетики на порядок (кинетика первого порядка – экспоненциальная, второго порядка, как правило, гиперболическая). Многокомпонентные кинетики разлагались на элементарные составляющие и определялись параметры затухания каждой. Анализ ошибки в определении параметров кинетики с использованием применяемой в данной работе методики был проведен в [33], погрешность составляет около 10 %.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках научно-исследовательского проекта. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

В связи с тем, что экономика является неотъемлемой, постоянной и динамически развивающейся частью жизни, возникает необходимость непрерывно проводить исследование и мониторинг рынка. Поиск конкурирующих проектов позволяет определить необходимость и значимость новых разработок, а также их эффективность в случае успешной реализации конечного продукта.

Данный раздел предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательского проекта;
- расчет бюджета научно-исследовательского проекта;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – исследовать оптико-люминесцентные свойства алюмооборатной стеклокерамики, активированной ионами хрома.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научно-исследовательский проект, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Основным отечественным конкурентом является научная группа: «Стекловидных и стеклокерамических покрытий». Данная группа занимается исследованиями в области стекла и покрытий из стеклокерамики, используя различные технологии синтеза, но разработок по теме алюмообратной стеклокерамики, активированной ионами хрома, нет.

Анализ конкурентных технических решений проведен с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 4.1.1.

Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5-ти бальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 4.1.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | Конкурентоспособность | |
|---|--------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| | | Б _ф | Б _{кл} | Б _ф | Б _{кл} |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | |
| Безопасность | 0,2 | 5 | 5 | 0,4 | 0,4 |
| Долговечность | 0,05 | 4 | 4 | 0,25 | 0,2 |
| Точность измерений | 0,05 | 5 | 5 | 0,25 | 0,1 |
| Новизна разрабатываемого материала | 0,3 | 5 | 5 | 0,2 | 0,1 |
| Оптимальная технология синтеза | 0,1 | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | |
| Цена | 0,2 | 5 | 3 | 0,6 | 0,8 |
| Финансирование научно-исследовательского проекта | 0,05 | 5 | 4 | 0,4 | 0,4 |
| Предполагаемый срок эксплуатации | 0,05 | 5 | 5 | 0,25 | 0,25 |
| Итого | 1 | 39 | 36 | 2,4 | 2,3 |

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что разрабатываемый материал является наиболее эффективным и предпочтительным по сравнению с отечественным конкурентом.

4.1.2 SWOT-анализ

Для комплексной оценки научно-исследовательского проекта применяют SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Итоговая матрица SWOT-анализа представлена в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.2 – Итоговая матрица SWOT-анализа

| | Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Наличие бюджетного финансирования С2. Наличие опытного руководителя С3. Использование современного оборудования С4. Наличие современного программного продукта С5. Актуальность проекта С6. Экологичность технологии | Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Развитие новых технологий Сл2. Высокая стоимость оборудования Сл3. Отсутствие квалифицированного персонала Сл4. Длительная обработка полученных результатов |
|---|--|---|
| Возможности: В1. Сотрудничество с зарубежными профессорами в этой области В2. Проведение новых научных исследований В3. Использование инновационной инфраструктуры НИ ТПУ | - Высока вероятность совместной работы с рядом ведущих вузов для проведения совместных исследований; - Получение материала с высокими эксплуатационными свойствами. | Снижение цен на рынке материалов. |

| | | |
|--|--|--|
| В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт | | |
| В5. Повышение спроса | | |
| В6. Повышение стоимости конкурентных разработок | | |
| Угрозы: У1. Появление новых улучшенных технологий У2. Ограничение финансирования со стороны ТПУ У3. Отсутствие спроса. | - Так как тема актуальна нужно повышать уровень квалификации работников, особенно необходимо при работе с современным оборудованием. | - Расширение области применения за счет развития новых технологий. |

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках научно-исследовательского проекта;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного научно-исследовательского проекта необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят научный руководитель и студент. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Перечень основных этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № работы | Содержание работ | Должность исполнителя |
|---------------------------------|----------|--|--------------------------------|
| Разработка технического задания | 1 | Составление и утверждение технического задания на ВКР | Научный руководитель |
| Выбор направления исследования | 2 | Анализ актуальности темы | Научный руководитель - инженер |
| Обзор литературы | 3 | Поиск и изучение материала по теме | инженер |
| | 4 | Подбор нормативных документов | Научный руководитель-инженер |
| Объекты и методы исследования | 5 | Изучение синтеза исследуемых образцов | инженер |
| | 6 | Изучение экспериментальных методик | инженер |
| Анализ результатов исследований | 7 | Спектры поглощения для 2-х серий объектов исследования | Научный руководитель-инженер |
| | 8 | Спектры импульсной катодолюминесценции для 2-х серий объектов исследования | Научный руководитель-инженер |
| | 9 | Кинетика затухания люминесценции для 2-х серий объектов исследования | Научный руководитель-инженер |
| Составление документации | 10 | Написание пояснительной записки о выполненной работе | инженер |

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

В данной работе трудовые затраты образуют основную часть стоимости научно-исследовательского проекта. Поэтому немаловажным является определение трудоемкости работ каждого из участников проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость носит стохастический характер, данную величину можно определить экспертным путем в «человеко-днях».

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ож\ i}$ определяется по формуле:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{мин\ i} + 2t_{макс\ i}}{5},$$

где $t_{мин\ i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{макс\ i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{\chi_i},$$

где χ_i – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем выполняемым работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 3.2.2.

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма состоит из блоков, расположенных на двух осях: по вертикали располагаются задачи, из которых состоит проект, а время,

запланированное на их выполнение, служит горизонтальной осью диаграммы Ганта. Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ представлен на примере работы «Составление и утверждение технического задания на ВКР»:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 5}{5} = 3,2 \text{ чел-дн},$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \text{ раб.дн.},$$

Расчет календарного коэффициента на 2020 год:

$$k_{кал.} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{366}{366 - 66} = 1,22$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы на примере работы «Опτικο-люминесцентные свойства алюмооборатной стеклокерамики, активированной ионами хрома»:

$$T_{ki.студ.} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 47,54 \cdot 1,22 = 57,99 \approx 58 \text{ календарных дней}$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы на примере работы «Составление и утверждение технического задания на ВКР»:

$$T_{ki, \text{рук.}} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,22 = 2,44 \approx 3 \text{ календарных дня}$$

Все рассчитанные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 3.2.2.

Таблица 3.2.2 – Временные показатели проведения научно-исследовательского проекта

| Название работы | Трудоемкость работ | | | | | | Длительнос ть работ в рабочих днях T_{pi} | | Длительно сть работ в календарн ых днях T_{ki} | |
|--|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|--|---------|---|---------|
| | t_{min} , чел-дни | | t_{max} , чел-дни | | $t_{ожi}$, чел-дни | | | | | |
| | Руководитель | Инженер | Руководитель | Инженер | Руководитель | Инженер | Руководитель | Инженер | Руководитель | Инженер |
| Составление и утверждение технического задания | 2 | - | 5 | - | 3,2 | - | 3,2 | - | 3 | - |
| Анализ актуальности темы | - | 4 | - | 6 | - | 4,8 | - | 4,8 | - | 6 |
| Поиск и изучение материала по теме | - | 6 | - | 10 | - | 7,6 | - | 7,6 | - | 10 |
| Подбор нормативных документов | 2 | 2 | 3 | 3 | 2,4 | 2,4 | 1,2 | 1,2 | 2 | 2 |
| Изучение синтеза исследуемых образцов | - | 3 | - | 6 | - | 4,2 | - | 4,2 | - | 6 |

| | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| Изучение экспериментальных методик | - | 7 | - | 10 | - | 8,2 | - | 8,2 | - | 10 |
| Спектры поглощения для 2-х серий объектов исследования | 2 | 2 | 4 | 4 | 2,8 | 2,8 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 3 |
| Спектры импульсной катодолюминесценции для 2-х серий объектов исследования | 3 | 3 | 5 | 5 | 3,8 | 3,8 | 1,9 | 1,9 | 2 | 2 |
| Кинетика затухания люминесценции для 2-х серий объектов исследования | 4 | 4 | 6 | 6 | 4,8 | 4,8 | 2,4 | 2,4 | 2 | 3 |
| Написание пояснительной записки о выполненной работе | - | 7 | - | 10 | - | 8,2 | - | 8,2 | - | 13 |

После произведенных расчетов, представленных в таблице 3, строится диаграмма Ганта, представленная в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Календарный план график проведения НИП

▨ –Инженер ■ – Научный руководитель

| № ра бо ты | Вид работы | Исполнитель | Тк,дн | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--|---------------------------|----------|---------|---|---|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|
| | | | | февраль | | | март | | | апрель | | | май | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель | 3 | ■ | | | | | | | | | | | |
| 2 | Анализ актуальности темы | Инженер | 6 | ▨ | ▨ | | | | | | | | | | |
| 3 | Поиск и изучение материала по теме | Инженер | 10 | | ▨ | ▨ | | | | | | | | | |
| 4 | Подбор нормативных документов | Руководитель- Инженер | 2 2 | | ▨ | | | | | | | | | | |
| 5 | Изучение синтеза исследуемых образцов | Инженер | 6 | | ▨ | ▨ | | | | | | | | | |
| 6 | Изучение экспериментальных методик | Инженер | 10 | | | ▨ | ▨ | | | | | | | | |
| 7 | Спектры поглощения для 2-х серий объектов исследования | Руководитель- Инженер | 1,5 3 | | | | ▨ | ▨ | | | | | | | |
| 8 | Спектры импульсной катодолюминесценции для 2-х серий объектов исследования | Руководитель- Инженер | 2 2 | | | | ▨ | ▨ | | | | | | | |
| 9 | Кинетика затухания люминесценции для 2-х серий объектов исследования | Руководитель Инженер - | 2 3 | | | | ▨ | ▨ | | | | | | | |
| 10 | Написание пояснительной записки о выполненной работе | Инженер | 13 | | | | | | | | ▨ | ▨ | | | |

Таблица 4.2.4 – Сводная таблица по календарным дням

| | Количество дней |
|---|-----------------|
| Общее количество календарных дней для выполнения работы | 65,5 |
| Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер | 55,5 |
| Общее количество календарных дней, в течение которых работал научный руководитель | 10 |

В результате выполнения данного подраздела разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из участников проекта.

4.3 Бюджет научно-исследовательского проекта

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-исследовательского проекта

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. Поэтому необходимо учитывать материальные затраты. В данной работе в материальные затраты включаются затраты на материалы для исследования, бумага офисная, картридж для принтера, интернет, ручка и тетрадь (таблица 4.3.1).

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i} = (1 + 0,25) \cdot 6040 = 7550 \text{ руб.},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (в данной работе принимается равным 25 %).

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение материалов для исследования. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблица 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Материальные затраты

| Наименование | Цена за ед., руб. | Количество, ед. | Суммарная стоимость, руб. |
|---|-------------------|-----------------|---------------------------|
| Стеклокерамика | 300 | 15 | 4500 |
| Бумага офисная | 2 | 150 листов | 300 |
| Картридж для принтера | 1000 | 1 шт. | 1000 |
| Интернет | 350 | 3 месяца | 1050 |
| Ручка | 25 | 1 шт. | 25 |
| Тетрадь | 85 | 1 шт. | 85 |
| Всего за материалы, руб. | | | 6960 |
| Транспортно-заготовительные расходы, руб. | | | 195 |
| Итого по статье, руб. | | | 7155 |

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов. При выполнении научно-исследовательского проекта использовался ноутбук Asus. Срок полезного использования данного ноутбука по паспорту составляет 3 года.

Таблица 4.3.2 – Затраты на оборудование

| № | Наименование оборудования | Кол-во, шт. | Срок полезного использования, лет | Цены единицы оборудования, тыс. руб. | Общая стоимость оборудования, тыс. руб. |
|--------------|---------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | Ноутбук | 1 | 3 | 30 | 30 |
| Итого | | 30 тыс. руб. | | | |

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,33 \cdot 30000}{12} \cdot 3 = 2475 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей НИП

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого, необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33664 \cdot 10,4}{246} = 1423,19 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{м}}$ – должностной оклад работника за месяц;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня – $M=11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

- при отпуске в 48 раб. дней – $M=10,4$ месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{12664 \cdot 11,2}{213} = 665,9 \text{ руб.},$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 1423,19 \cdot 21 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 58280 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 665,9 \cdot 21 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 27268 \text{ руб.}$$

где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, принимается равным 0,3;

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок, принимается равным 0,2;

$k_{р}$ – районный коэффициент, принимается равным 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.3.3 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни | 52/14 | 104/14 |
| Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни | 48/5 | 24/10 |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 246 | 213 |

Таблица 4.3.4 – Расчет основной заработной платы

| Исполнители НИП | $З_{тс}$, руб | $k_{пр}$ | $k_{д}$ | $k_{р}$ | $З_{м}$, руб | $З_{дн}$, руб | $T_{р}$, раб.дн. | $З_{осн}$, руб |
|--------------------|----------------|----------|---------|---------|---------------|----------------|-------------------|-----------------|
| Руководитель | 29887 | 0,3 | 0,2 | 1,3 | 58280 | 1423,19 | 10 | 14231,9 |
| Инженер | 13984 | 0,3 | 0,2 | 1,3 | 27268 | 665,9 | 55,5 | 36957,45 |
| Итого: | | | | | | | | 51189,35 |

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 14231,9 = 2134,78 \text{ руб.}$$

Для студента:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 36957,45 = 5543,6 \text{ руб.}$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (14231,9 + 2134,78) = 4910 \text{ руб.}$$

Для студента:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (36957,45 + 5543,6) = 12750,3 \text{ руб.}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя прочие затраты, такие как: печать и ксерокопирование документов, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и др.

Накладные расходы в целом рассчитываются по формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр} = 86158 \cdot 0,2 = 17231,6 \text{ руб.}$$

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр} = 244430,3 \cdot 0,2 \approx 48886,1 \text{ руб.}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимается равным 0,2).

4.3.7 Бюджетная стоимость

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИП по форме, приведенной в таблице 4.3.7

Таблица 4.3.7 – Группировка затрат по статьям

| Статьи | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Материальные затраты | Амортизация | Основная зароботная плата | Дополнительн ая зароботная плата | Отчисления на социальные нужды | Итого без накладных расходов | Накладные расходы | Итого бюджетная стоимость |
| 7155 | 2475 | 51189,35 | 7678,38 | 17660,3 | 86158 | 17231,6 | 103389,6 |

4.4 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научно-исследовательского проекта. В рамках данной рассмотрены два варианта исполнения, поскольку данный проект является уникальным, который выполняется в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения».

Для определения интегрального показателя финансовой эффективности наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналога выступает среда имитационного моделирования GIBBS, также предназначенная для моделирования химико-технологических процессов.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{103389,6}{130000} = 0,795 = 0,8$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Далее необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Критерии | Весовой коэффициент | Бальная оценка проекта | Бальная оценка аналога |
|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Надежность | 0,2 | 5 | 4 |
| Универсальность | 0,2 | 4 | 4 |
| Уровень материалоемкости | 0,15 | 4 | 3 |
| Функциональная мощность | 0,2 | 5 | 5 |
| Ремонтопригодность | 0,1 | 5 | 2 |
| Энергосбережение | 0,15 | 4 | 2 |
| Итого: | 1 | 4,65 | 3,33 |

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп.1}}}{I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.1}}} = \frac{4,65}{0,8} = 5,8.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}} = \frac{6,45}{2,36} \approx 2,73.$$

Таблица 4.5 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

| № п/п | Показатели | Разработка | Аналог |
|----------|---|------------|--------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель разработки | 0,8 | 1 |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,65 | 3,25 |
| 3 | Интегральный показатель эффективности | 5,8 | 2,8 |
| 4 | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 0,66 | 0,37 |

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенного анализа конкурентных технических решений оказалось, что разрабатываемый проект является более конкурентноспособным, чем его аналог.

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и студента, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 65,5 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал студент – 55,5 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 10;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 103389,6 рублей;

4. По факту оценки эффективности научно-исследовательского проекта, можно сделать следующие выводы:

- значение интегрального финансового показателя НИП составляет 0,8, что является показателем того, что научно-исследовательский проект является финансово выгодным по сравнению с аналогом;
- значение интегрального показателя ресурсоэффективности научно-исследовательского проекта составляет 4,65, а конкурента составляет 3,25;
- значение интегрального показателя эффективности НИП составляет 5,8, а конкурента 2,8, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в НИП, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Список публикаций студента

Результаты исследований были опубликованы в научных журналах:

D.Valiev, A.N.Babkina, K.S. Zyryanova, R.K.Nuryev, A.I.Ignatiev, A.Yu.Osipova, «Radiation-induced processes in alkali-alumina-borate glass-ceramics doped with Cr^{3+} ions»

Journal of Non-Crystalline Solids. Volume 534, 15 2020, 119947

Представлены на конференциях:

1) XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук».

«Люминесцентные свойства $\text{WO}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ стекол, допированных ионами тербия». Осипова А.Ю.

Сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Перспективы развития фундаментальных наук. Том 2. Химия. Томск, 23-26 апреля 2019. – 177-179 с.

2) Юбилейная международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 50-летию Первой летней школы по люминесценции в Иркутске.

«Влияние примесного иона гадолиния на сцинтилляционные характеристики алюмо-боро-силикатных стекол». Осипова А.Ю.

Материалы юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. Иркутск, 1-6 июля 2019. – 65-66 с.

3) VIII Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» прошедшая в рамках II Международного молодежного конгресса «Современные материалы и технологии новых поколений.

«Люминесцентные свойства алюмо-боро-силикатных стекол, допированных ионами тербия». Осипова А.Ю.

Сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса

«Современные материалы и технологии новых поколений»

Секция 5. Химические технологии и биотехнологии. Томск, 30 сентября-5 октября 2019. – 253-254 с.

4) 14th International Forum on Strategic Technology.

Valiev D. T. , Agafonova D. A. , Babkina A. N. , Oreshkina K. V. , Zyrjyanova K. S. , Osipova A. Y. «Luminescent properties of $\text{Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ glass-ceramics doped with Cr^{3+} ions»

14th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2019): Proceedings, Tomsk, October 14-17, 2019. - Tomsk: TPU Publishing House, 2019 - p. 91-94.